

На правах рукописи

Титов Анатолий Геннадьевич



**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЯ В ЭЛЕКТРО-
ЦИКЛОНЕ ПУТЁМ СНИЖЕНИЯ ВТОРИЧНОГО УНОСА**

05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2014

Работа выполнена на кафедре «Процессы и аппараты химической технологии» Химико-Технологического Института Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Ермаков Сергей Анатольевич

Официальные оппоненты: Асламова Вера Сергеевна,
доктор технических наук, профессор,
ГОУ ВПО Иркутский государственный
университет путей сообщения,
профессор кафедры техносферной
безопасности

Стефаненко Валерий Тимофеевич,
кандидат технических наук, с. н. с.,
ООО НПО «Восточный научно –
исследовательский углехимический
институт»,
научный консультант

Ведущая организация: ОАО «Свердловский научно-исследовательский институт химического машиностроения» (ОАО «СвердНИИХиммаш»), г. Екатеринбург.

Защита состоится «17» февраля 2015 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.269.08 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу 634050, г. Томск, проспект Ленина, дом 43, корпус 2, 117 аудитория.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/915/worklist>

Автореферат разослан «13» января 2015 г.

Учёный секретарь диссертационного совета

Т. С. Петровская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время остро стоит проблема тонкой очистки больших объемов газов от дисперсных частиц. Это связано как с необходимостью улавливания целевого продукта промышленных предприятий, так и с очисткой сбросных газов от пыли в электроэнергетике. В том и другом случае пылеулавливающее оборудование должно обеспечивать максимально возможную эффективность. Особенно остро стоит вопрос очистки дымовых газов ТЭС от золы-уноса. Из всего объема вырабатываемой в мире энергии 27 % приходится на долю ТЭС, работающих на угле. В обычном режиме ТЭС выбрасывает в атмосферу более 700 000 тонн золы-уноса в год. Только в РФ, по разным оценкам, ежегодно вырабатывается 27–35 миллионов тонн золы-уноса.

Для очистки выбрасываемых в атмосферу газов от золы-уноса применяют аппараты разного принципа действия и конструкции: скрубберы, циклоны, пылесоса-дительные камеры, электрофилтры и другие. Указанные аппараты имеют как преимущества над другими, так и недостатки, к примеру, циклоны имеют высокую степень очистки (до 90 %) от крупных (свыше 40 мкм) частиц и возможность работы с аэрозолями большой концентрации (свыше 50 г/м³), в свою очередь электрофилтры пригодны для улавливания мелких (менее 40 мкм, а также субмикронных) частиц, но могут работать с относительно небольшими концентрациями (до 50 г/м³) золы. Применяемые в настоящее время многопольные пластинчатые электрофилтры сравнительно дороги, громоздки и не обеспечивают требуемую высокую степень очистки, которая при современном уровне технологий должна составлять 99,5–99,7 %. Мокрая очистка газов в эмульгаторах затрудняет утилизацию золы, так как необходимо ее выделение из пульпы и последующая сушка. Для этого требуются значительные затраты тепла.

В связи с возрастающими природоохранными требованиями задача разработки высокоэффективного оборудования для очистки больших объемов (сотни тыс. м³/ч) газов является весьма актуальной.

Одним из вариантов решения задачи является использование в пылеулавливающих аппаратах использование различного вида полей. Благодаря этому, кроме центробежных сил, на дисперсные частицы будут действовать кулоновские силы. Однако известные в настоящее время конструкции электроциклонов, обеспечивая высокую степень очистки газов от пыли в одиночном исполнении, имеют производительность не более 15 тыс. м³/ч. Батареи из нескольких параллельно работающих аппаратов громоздки и неудобны в эксплуатации. Одним из важных условий эффективной работы электроциклона является отсутствие (либо снижение) вторичного уноса. Тщательный анализ публикаций в мировой технической литературе показал, что систематические исследовательские работы по изучению явления вторичного уноса в электроциклонах не проводятся.

Тематика настоящего исследования соответствует «Перечню критических технологий Российской Федерации», а именно разделу «Технологии мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации ее загрязнения». Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект

№ 14-08-00046 А «Вторичный унос в электроциклоне. Механизм и природа процесса, математическая модель и методы устранения»).

Степень разработанности темы исследования

Одним из вариантов решения задачи является использование в пылеулавливающих аппаратах одновременно нескольких силовых полей. Например, в центробежных пылеуловителях-циклонах можно создать сильное электрическое поле. Благодаря этому, кроме центробежных сил, на пылевые частицы будут действовать кулоновские силы. Очевидно, что совместное действие указанных сил обеспечит высокую степень очистки газа также от более мелких частиц.

Известные в настоящее время конструкции электроциклонов, обеспечивая высокую степень очистки газов от пыли в одиночном исполнении, имеют производительность не более 15 тыс. м³/ч. Батареи из нескольких параллельно работающих аппаратов громоздки и неудобны в эксплуатации.

В то же время далеко не все аспекты данной тематики находятся в разработке. Одним из важных условий эффективной работы электроциклона является отсутствие (либо снижение) вторичного уноса. Тщательный анализ публикаций в мировой технической литературе показал, что исследовательские работы по вторичному уносу в электроциклонах не проводятся.

Цель и задачи

Цель работы – повышение эффективности работы электроциклона за счет снижения вторичного уноса изменением технологических режимов работы и разработкой конструктивных элементов.

Для достижения указанной цели решались следующие задачи:

1. Создание экспериментальной установки для исследования влияния физических, гидродинамических, конструктивных параметров процесса пылегазоочистки на вторичный унос.
2. Проведение экспериментальных исследований по влиянию вторичного уноса на эффективность пылеулавливания.
3. Установление закономерностей вторичного уноса в электроциклоне; разработка математической модели вторичного уноса.
4. Разработка методов и конструктивных решений для снижения вторичного уноса и апробация их на практике.

Научная новизна

1. Впервые установлено влияние технологических параметров процесса пылегазоочистки (скорость потока в интервале 14–27 м/с, концентрация аэрозоля в потоке от 2 до 30 г/м³, рабочее напряжение на коронирующих электродах в диапазоне 0–17 кВ, конфигурация профилированных элементов, орошение осадительного электрода) на степень вторичного уноса. Показано, что наибольшее влияние оказывает скорость аэрозоля на входе в аппарат.

2. Установлено, что наличие вторичного уноса в электроциклоне при увеличении скорости аэрозоля в интервале 14–27 м/с и концентраций пыли на входе в аппарат 2,4–30,6 г/м³ снижает степень очистки на 6,0–32,7 %. Степень очистки может быть повышена путем снижения вторичного уноса с помощью установки профилированных элементов на осадительные электроды либо путем устранения вторичного уноса с помощью орошения жидкостью поверхности осадительных электродов.

3. Определены основные факторы, влияющие на пылегазоочистку в электроциклоне (скорость и концентрация аэрозоля, напряжение на коронирующих электродах и геометрия активной зоны), которые легли в основу предложенной математической модели, позволяющей рассчитывать траектории движения частиц, значения их мгновенных скоростей, распределение скоростей газа и электрического поля, а также оптимальные технологические (диаметр, длину активной зоны, скорость аэрозоля и другие) и электрические (межэлектродное расстояние, напряжение питания, конфигурация коронирующих электродов) характеристики аппарата.

Практическая значимость работы

1. Разработана конструкция электроциклона с пониженным вторичным уносом, на конструкцию получен патент. При использовании этой конструкции вторичный унос может быть снижен в 1,3–26,7 раз в диапазоне $W_{ВХ} = 15,0–27,0$ м/с и $C_{ВХ} = 2,0–30$ г/м³ путем применения в системах осадительных электродов профилированных элементов с глубиной от 3,0 до 7,0 мм и шириной от 30, до 7,0 мм. Так при $W_{ВХ} = 18,0$ м/с, $C_{ВХ} = 9,0$ г/м³ вторичный унос снижается в 2,0 раза (с 6,6 до 3,3 %), а при $W_{ВХ} = 24,0$ м/с, $C_{ВХ} = 9,0$ г/м³ вторичный унос снижается в 4,9 раз (с 32,7 до 6,6 %). Целесообразно выполнять С-образные элементы.

2. Разработана компьютерная модель для проектирования промышленных газоочистных аппаратов и разработан алгоритм, позволяющий рассчитывать технологические характеристики электроциклона с помощью ЭВМ (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа для расчета электроциклона» № 2014615834 от 04.06.2014 г.).

3. Опытно-промышленный электроциклон рекомендован к внедрению на участке пылеулавливания линии сушки микросфер ЗАО УралНИПИнефть (г. Екатеринбург, Свердловская область). По результатам диссертационного исследования составлено техническое задание на разработку рабочего проекта промышленного аппарата производительностью 100 000 м³/ч ООО «Химтехнология» (г. Екатеринбург), позволяющего сократить потери продукта от 2 до 2,5 раз по сравнению с существующей технологией.

4. Основные результаты работы используются в учебном процессе при подготовке студентов ФГАОУ ВПО УрФУ (г. Екатеринбург) при изучении дисциплины «Процессы и аппараты химической технологии».

Объект исследования

Объектом исследования является электроциклон типа ЭЦВ (электроциклон вертикальный).

Предмет исследования

Предмет исследования – закономерности процесса вторичного уноса в электроциклоне и конструктивные элементы и особенности электроциклона.

Методы исследования и степень достоверности результатов

Проведен информационный анализ по проблеме вторичного уноса и газоочистки в электроциклонах с применением таких источников, как Scopus, Science Direct, Google Scholar, EBSCO, баз данных Роспатента, РГБ и ЗНБ УрФУ.

В работе применены методы математического и компьютерного моделирования с использованием пакета прикладных программ Comsol Multiphysics, а также экспериментальных методов при определении эффективности электроциклона пу-

тём отбора проб аэрозоля на выходе из аппарата аспирационным методом. Определение количества пылевидного материала в пробе проводилось с помощью гравиметрии. Для качественной оценки поведения частиц в активной зоне использовался метод фотографирования траекторий. Численные расчёты по компьютерной модели велись путём решения систем дифференциальных уравнений методом конечных элементов, была использована стандартная k-ε-модель турбулентности. Статистическая обработка результатов была осуществлена с использованием регрессионного анализа, в частности метода наименьших квадратов.

Достоверность результатов обеспечивается применением стандартных методов измерения и измерительных приборов, прошедших поверку, а также воспроизводимостью и статистической достоверностью результатов, подтвержденной математической обработкой.

Реализация результатов работы

Основные результаты работы используются в учебном процессе при подготовке студентов ФГАОУ ВПО УрФУ (г. Екатеринбург) при изучении дисциплины «Процессы и аппараты химической технологии»; рекомендованы к внедрению ЗАО УралНИПИНефть (г. Екатеринбург), электроциклон позволит уменьшить потери продукта от 2 до 2,5 раз; также составлено и выдано техническое задание на разработку рабочего проекта промышленного аппарата производительностью 100 000 м³/ч ООО «Химтехнология» (г. Екатеринбург). Акты и справка о внедрении результатов приведены в приложении диссертации.

На защиту выносятся:

1. Зависимости по влиянию параметров процесса газоочистки (скорость и концентрация аэрозоля, рабочее напряжение на коронирующих электродах, орошение осадительного электрода и другие) на вторичный унос и эффективность электроциклона.
2. Способ снижения вторичного уноса в электроциклоне. Конструкции профилированных элементов. Сравнительный анализ эффективности элементов.
3. Математическая модель и компьютерное моделирование движения частиц в активной зоне электроциклона. Результаты вычислительного эксперимента. Анализ расчетных данных. Корреляционная зависимость результатов моделирования и физического эксперимента.

Личный вклад автора

Автор руководил экспериментальной работой, участвовал в постановке и проведении экспериментов, проводил математическую обработку результатов, разработал алгоритм по расчёту электроциклона на ЭВМ, готовил публикации. В соавторстве создан патент на полезную модель и подготовлены публикации. Автором разработана и изготовлена оригинальная ячейка модели изучения траекторий частиц в электроциклоне и профилированные элементы для электроциклона.

Апробация результатов

Материалы диссертации докладывались и обсуждались на международной конференции «Пылегазоочистка-2013» (Москва, 2013), всероссийской конференции «Химия в федеральных университетах» (Екатеринбург, 2013), международной практической конференции «Технические науки – от теории к практике» (Новосибирск,

2013), международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы современной науки» (Москва, 2012), международной научной конференции «Актуальные проблемы техники и технологии» (Липецк, 29 октября 2011 г.), международной научно-практической конференции «Техника и технология: новые перспективы развития» (Москва, 2011).

Публикации

По теме работы опубликовано 4 статьи в журналах, входящих в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, 8 тезисов докладов на конференциях разного уровня, получен 1 патент на полезную модель, разработана 1 программа для ЭВМ.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, выводов и списка использованной литературы. Объём работы составляет 135 страниц, 76 рисунков, 8 таблиц и приложения. Список литературы включает 84 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе «Современное состояние вопроса очистки газов от пыли» приводится обзор работ по пылегазоочистке, в том числе при использовании электроциклонов, описываются существующие конструкции электроциклонов, анализируются результаты работ в данной области.

Для очистки газов от взвешенных твердых и жидких частиц применяется разнообразное оборудование, отличающееся как по конструкции, так и по принципу действия. Среди негативных явлений, происходящих в процессе очистки газов в циклонах, электрофильтрах и электроциклонах особо выделяется вторичный унос – возвращение в поток газа уловленного материала вследствие различных причин.

Природа вторичного уноса в электрофильтрах и циклонах различна. Так в электрофильтрах значительное влияние на вторичный унос оказывает удельное электрическое сопротивление (УЭС) материала улавливаемых частиц, механическое воздействие крупных частиц и механическая регенерация электродов, тогда как в циклонах основной причиной вторичного уноса является гидродинамика потока, паразитные вихри в бункере и активное турбулентное перемешивание газа.

Возможности перспективного газоочистного аппарата – электроциклона – ограничены вторичным уносом, поскольку при превышении определенной (критической) скорости движения газа в электроциклоне резко снижается эффективность очистки.

Вторая глава «Характеристика объектов и методов исследований» посвящена описанию исследованных материалов и применяемых методов исследований. Приводится описание экспериментальной установки. В качестве объектов исследований выбраны материалы с различными физико-химическими свойствами и дисперсностью, представляющие собой продукты и отходы промышленных производств Поволжского и Уральского региона

1. Перкарбонат натрия с первой и второй стадий очистки отходящих газов распылительной сушилки на ОАО «Перкарбонат», г. Новочебоксарск, Чувашская Республика.

2. Пыль железо-ванадиевого концентрата, выделяющаяся в процессе обжига руды на ОАО «Качканарский Горно-Обогатительный Комбинат» (ОАО «КГОК»), г. Качканар, Свердловская область.
3. Возгоны печей выплавки черновой меди медеплавильного цеха ОАО «Среднеуральский медеплавильный завод», г. Ревда, Свердловская область.
4. Зола от сжигания угля Экибастузского месторождения на Рефтинской ГРЭС, пос. Рефтинский, Свердловская область.

Характеристики исследованных веществ, влияющие на степень очистки в электроциклоне, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики исследованных веществ

№	Исследованный материал	Плотность истинная, кг/м ³	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м	Медианный диаметр частиц, мкм
1	Перкарбонат натрия	2144	$<10^4$	35; 70
2	Железо-ванадиевый концентрат	5100	10^3	73
3	Возгоны медеплавильных печей	4600	10^7	6
4	Летучая зола	2200	$>10^8$	32

Для проведения исследований была использована лабораторная экспериментальная установка (стенд), показанная на рисунке 1. Стенд включал в себя электроциклон 1, пылеподатчик 2, тягонапоромер ТНЖ 3, источник высокого напряжения (модель ИВНР-20-10) 4, U-образную трубку для определения гидравлического сопротивления электроциклона 5, рукавный фильтр 6, подводящую трубу с коллектором 7, вентили 8, ротаметры 9, манометры 10, фильтродержатель (типа ИРА-20-2) 11, пробоотборник 12.

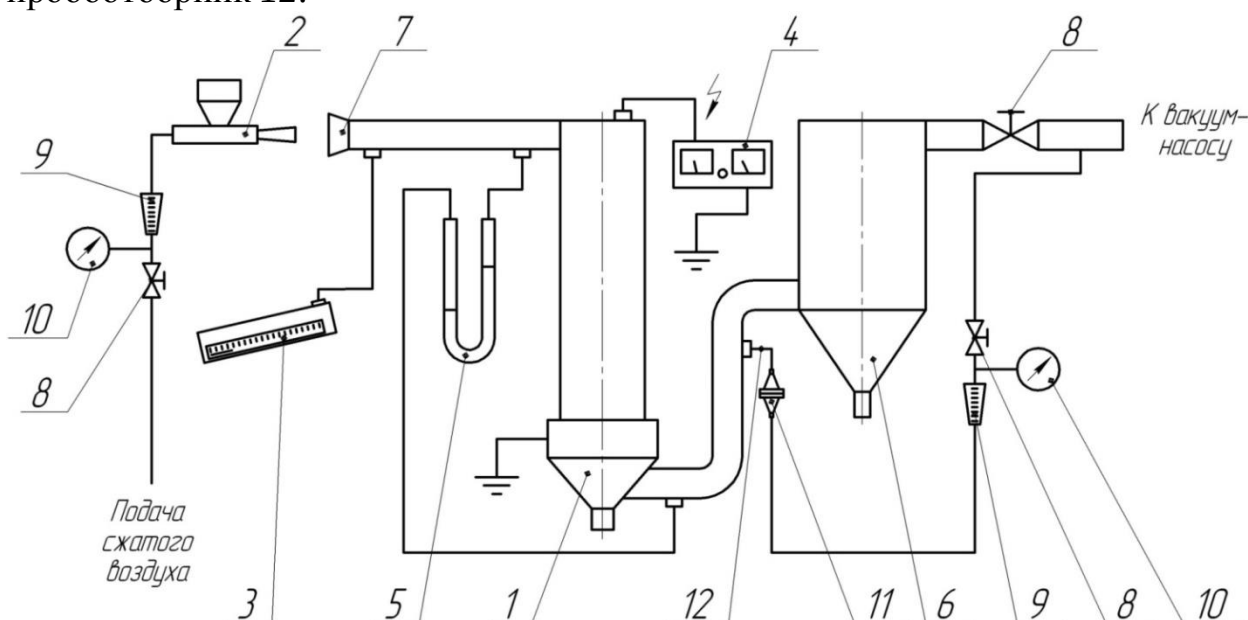


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки

Зола пылеподатчиком 2 подавалась в дезагрегированном виде по входной трубе 7 в электроциклон 1. Уловленная зола собиралась в бункере электроциклона 1, а очищенный воздух по воздуховоду удалялся через рукавный фильтр 6 в атмосферу.

Основным аппаратом экспериментальной установки являлся лабораторный электроциклон модели ЭЦВ (электроциклон вертикальный). Изометрическая схема электроциклона представлена на рисунке 2.

Электроциклон состоял из корпуса 1, улитки со входным патрубком 2, центральной трубы 3, коронирующей системы 4, выхлопной трубы 5, бункера 6 и изоляторов 7.

Для орошения осадительного электрода электроциклона 1 применялась расположенная в улитке ирригационная система, состоявшая из распределительного кольца 2 и подающих трубок 3. Суспензия из бункера 4 удалялась через гидрозатвор 5 в montage 6. Равномерное орошение стенки при поступательно-вращательном движении газа достигалось при расходе воды 8 л/мин.

Для проведения экспериментов использовалась фракция 0–100 мкм. Перкарбонат натрия, пылевидный железо-ванадиевый концентрат, возгоны печей выплавки черновой меди и зола диспергировались в пылеподатчике системы «труба Вентури» с эжекционной подачей порошка.

Запыленный поток газа попадает по входному патрубку в улитку, приобретает вращательное движение и далее перемещается по кольцевому каналу активной зоны электроциклона вращательно-поступательно вниз. Взвешенные в газе частицы пыли заряжаются в поле коронного разряда и под действием кулоновской силы перемещаются в кольцевом канале от коронирующих электродов к осадительным. Одновременно на частицы действуют центробежные силы, возникающие вследствие движения пылегазового потока по криволинейным каналам. Эти силы направлены в радиальном направлении от центра к периферии.

Скорость воздуха во входном патрубке электроциклона настраивалась вентилем по перепаду давления на тягонапоремере, подключенному к коллектору на входной трубе. Для измерения гидравлического сопротивления был использован дифференциальный манометр.

Концентрация золы в очищенном воздухе определялась весовым методом с использованием абсолютного аэрозольного фильтра АФА-ВП-20, изготовленного из волокнистого ПВХ (материал ФПП), закрепленного в фильтродержателе. Объем пропускаемого через фильтр воздуха определяется с помощью ротаметра типа РС-5 и настраивается с помощью вентиля нужный расход воздуха с соблюдением изокINETИЧНОСТИ отбора.

В электроциклоне применялась система коронирующих электродов рамной конструкции с коронирующими элементами игольчато-стержневого типа с ориентацией игл параллельно осадительным электродам (беличье колесо). Расстояние между иглами 40 мм.

На коронирующие электроды электроциклона высокое напряжение подавалось от источника питания ИВНР20-10, корпус и центральная труба электроциклона были заземлены.

Кольцевой канал состоял из двух областей – внутренней и внешней. Во внутренней области электрическая и центробежная сила действуют в противоположных направлениях. Однако, как показали расчеты, сила воздействия электрического поля на частицы диаметром менее 5 мкм значительно больше по величине, чем центро-

бежная сила. Поэтому на осадительных электродах внутренней области осаждались наиболее мелкие частицы.

Для проведения опытов с орошением описанный выше электроциклон дополнялся системой орошения и удаления пульпы (рисунок 3).

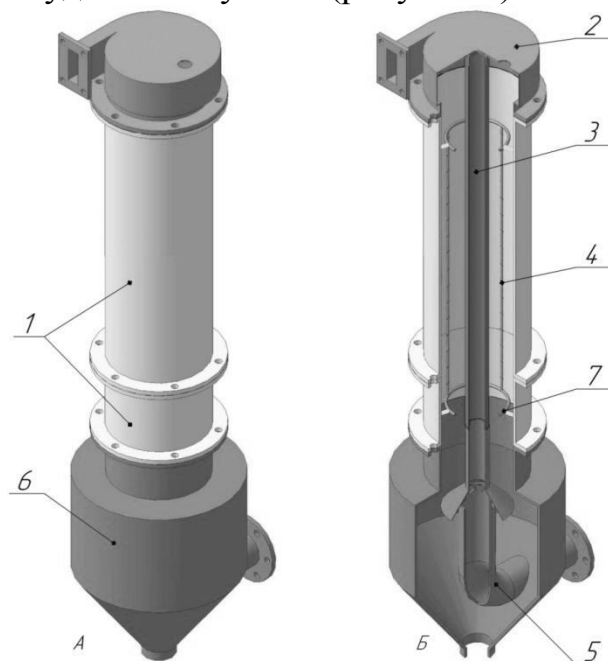


Рисунок 2. Изометрическое изображение модели электроциклона ЭЦВ:

А – внешний вид, *Б* – разрез. Обозначения на рисунке: 1 – корпус, 2 – улитка со входным патрубком, 3 – центральная труба, 4 – коронирующая система, 5 – выхлопная труба, 6 – бункер, 7 – изоляторы

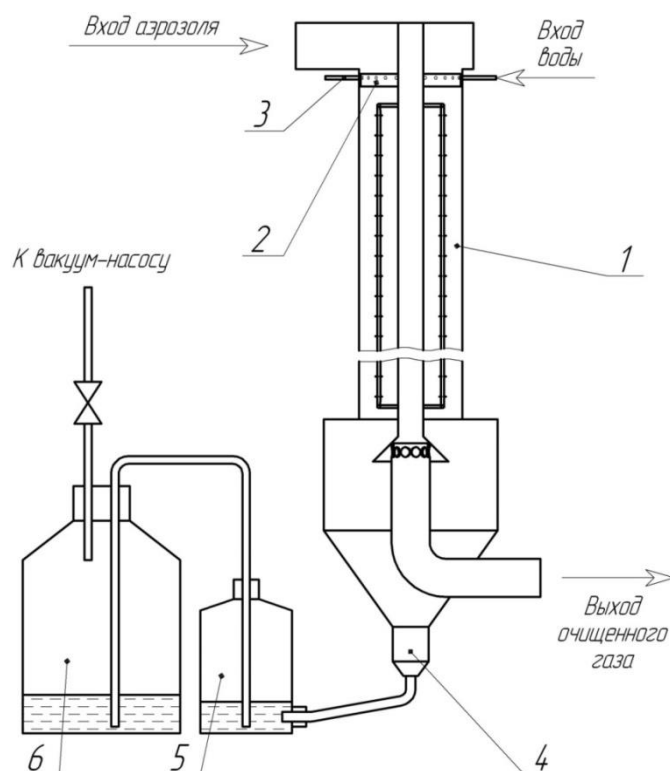


Рисунок 3. Схема установки для работы в мокром режиме: 1 – электроциклон, 2 – распределительное кольцо, 3 – подающие трубки, 4 – бункер, 5 – гидрозатвор, 6 – монтажу

Методика проведения эксперимента включает следующую последовательность операций:

1. Подготовка пробы исследуемого материала: отсев требуемой фракции, взвешивание, загрузка в бункер пылеподатчика.
2. Подготовка фильтра АФА: взвешивание, закрепление в фильтродержатель.
3. Включение источника высокого напряжения, установка требуемого значения напряжения.
4. Открытие вентиля вакуумной системы, установка требуемого расхода воздуха по тягонапоромеру.
5. Включение пылеподатчика, одновременно начинается отсчёт времени по секундомеру.
6. Проведение эксперимента. Запись показаний приборов.
7. Завершение эксперимента: выключение пылеподатчика, одновременно прекращение отсчёта времени.
8. Закрытие вентиля вакуумной системы.
9. Выключение источника высокого напряжения, снятие остаточного заряда.
10. Взвешивание фильтра АФА.
11. Обработка результатов эксперимента.

Для моделирования движения частицы в кольцевом канале электроциклона использован метод конечных элементов, реализованный в пакете прикладных программ Comsol Multiphysics.

В третьей главе «Исследование эффективности процесса улавливания технологических пылей и оценка вторичного уноса в электроциклонах» приведены экспериментально полученные зависимости по пылеулавливанию, а также анализируются экспериментальные данные. Полученные зависимости эффективности улавливания в электроциклоне от входной скорости аэрозоля при фиксированных значениях концентрации 5 г/м^3 (рис. 4 - 6).

Из рисунков 4–6 видно, что степень очистки при увеличении скорости аэрозоля на входе в электроциклон (в опытах с напряжением на электродах) изначально возрастает, проходит через максимум, а свыше 15-17 м/с снижается, в циклонном режиме (опыты без напряжения) наблюдается только снижение степени очистки с увеличением скорости аэрозоля.

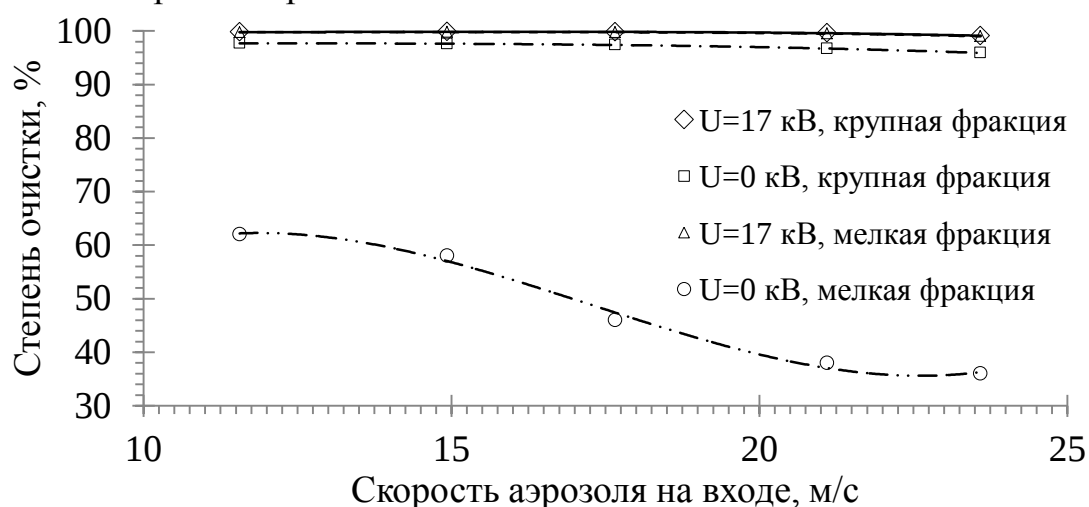


Рисунок 4. Зависимость степени очистки газа от персоли при различных скоростях потока на входе в ЭЦВ

Как было отмечено выше, при увеличении скорости газа в активной зоне возрастает центробежная сила, что благоприятствует осаждению частиц, но при постоянной длине аппарата время пребывания аэрозоля в активной зоне аппарата уменьшается, снижается эффективность зарядки частиц, увеличивается унос золы, это значит, что частицы не успевают осесть на осадительный электрод, увеличивается вторичный унос, т.к. уже осевшие частицы, особенно мелкие, выбиваются из слоя осадка крупными частицами и турбулентными вихрями.

Вторичный унос при пылеулавливании – паразитное явление. Он зависит от дисперсности материала, скорости потока газа, напряжения на электродах, конструктивных особенностей аппаратов и др. Представляет научный и практический интерес выявление зависимости эффективности работы электроциклона от указанных факторов. Для количественной оценки вторичного уноса были проведены эксперименты в сухом и мокром режимах работы электроциклона. После обработки экспериментальных данных были построены зависимости по уносу и вторичному уносу в электроциклоне.

Величину уноса можно представить как $(100 \% - \eta)$, что позволит оценить значения уноса в единицах степени очистки. Зависимость величины уноса от скорости при фиксированной концентрации $16,5 \text{ г/м}^3$ показана на рисунке 7.

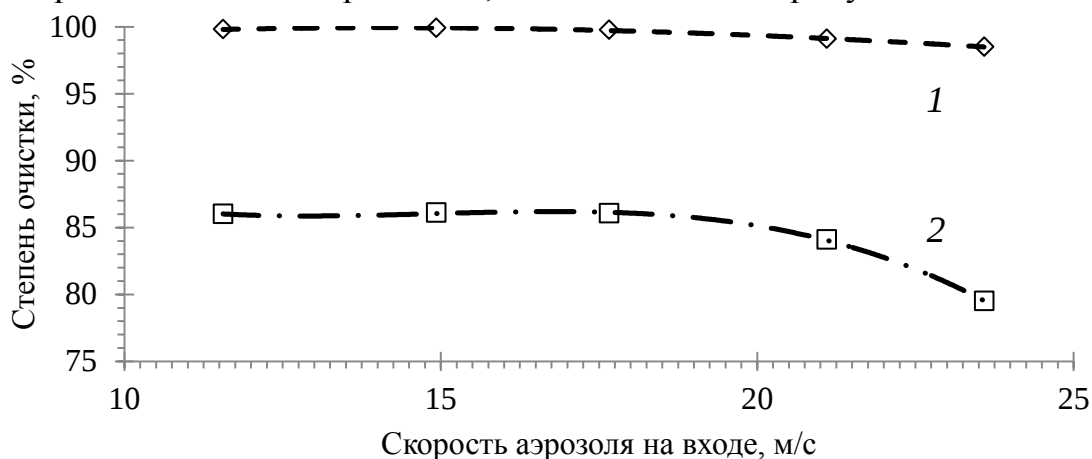


Рисунок 5. Зависимость степени очистки аэрозоля пыли железо-ванадиевого концентрата от скорости аэрозоля на входе в ЭЦВ: 1 – опыты с напряжением на электродах 17 кВ; 2 – опыты без напряжения

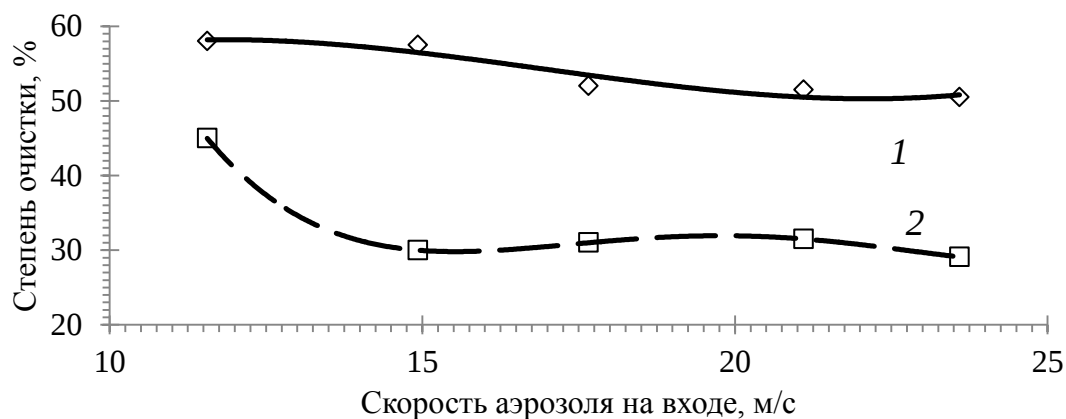


Рисунок 6. Зависимость степени очистки аэрозоля пыли железо-ванадиевого концентрата от скорости аэрозоля на входе в ЭЦВ: 1 – опыты с напряжением на электродах 17 кВ; 2 – опыты без напряжения

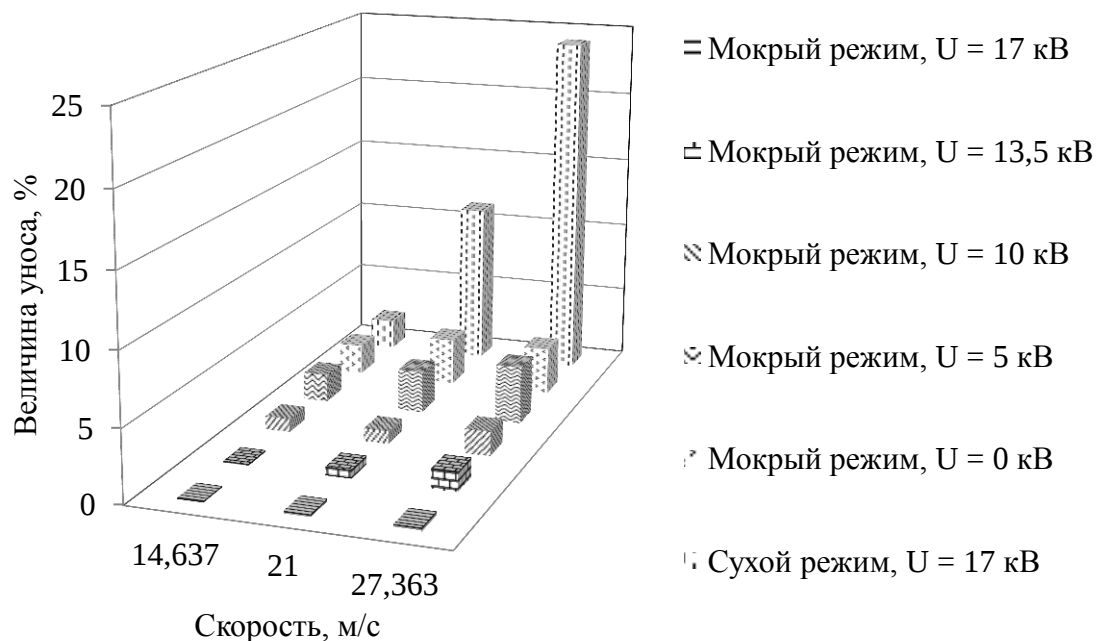


Рисунок 7. Величина уноса при различных режимах работы электроциклона

Из рисунка 7 видно, что в мокром режиме при $U = 17$ кВ (электроциклонный режим) унос составляет менее 1 %, при снижении напряжения до $U = 0$ кВ (циклонный режим) унос достигает 5 – 7 %, тогда как унос в сухом режиме при $U = 17$ кВ имеет значения 12 – 25 %.

По данным эксперимента также были рассчитаны значения вторичного уноса как разницы между степенью очистки в мокром и сухом режиме для соответствующих точек плана. Зависимость величины вторичного уноса от входной скорости и концентрации аэрозоля золы показана на рисунке 8.

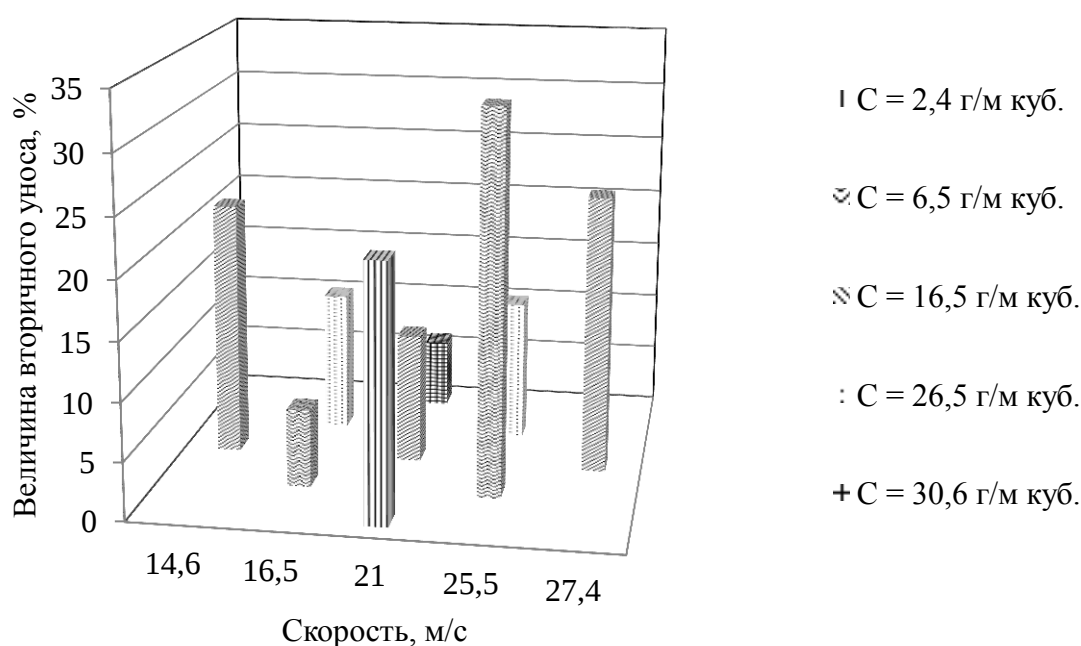


Рисунок 8. Величина вторичного уноса при различных начальных скоростях аэрозоля. Сухой режим работы электроциклона

Вторичный унос имеет величину от 5 до 35 %, наибольшие значения наблюдаются при скоростях больше 21 м/с. Среднее значение 10 – 15 %, что существенно выше уноса, вызванного недозарядкой. Таким образом, вторичный унос снижает эффективность улавливания золы в электроциклоне на 5 – 35 % при скоростях аэрозоля 14,6 – 27,4 м/с, соответственно увеличивая пылеунос в 10 – 50 раз.

Уменьшение вторичного уноса возможно путем установки на осадительные электроды профилированных элементов. Схема профилированного элемента С-образной формы изображена на рисунке 9.

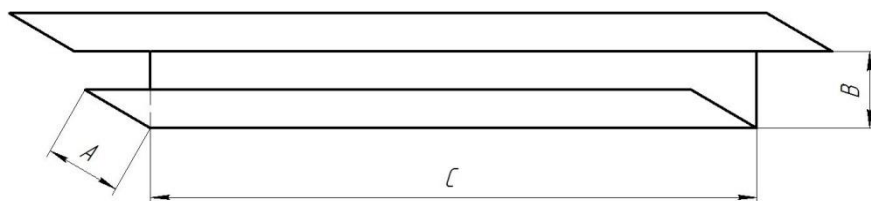


Рис. 9. Схема профилированного элемента С-образной формы

Результаты экспериментов по снижению вторичного уноса приведены на рисунках 10 и 11.

Установка профилированных элементов С-образной формы (рисунки 10, 11) в лабораторной модели электроциклона позволяет снизить вторичный унос в 1,3–26,7 раз при значениях начальной скорости от 15 до 27 м/с и концентрации аэрозоля в диапазоне 2–30 г/м³. Наибольшее снижение наблюдается при скорости 15 м/с и концентрации 16 г/м³ (26,7 раз), наименьшее при скорости 21 м/с и концентрации 30 г/м³ (1,3 раза), в среднем в 2–4 раза.

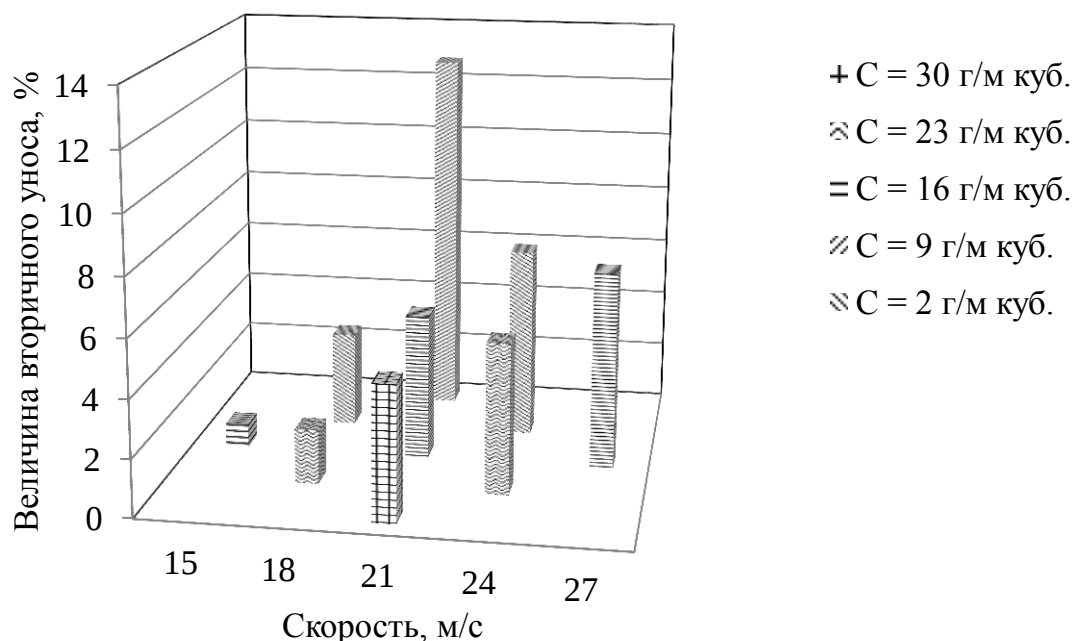


Рисунок 10. Величина вторичного уноса при различных начальных скоростях аэрозоля. Электроциклон с установленными профилированными элементами

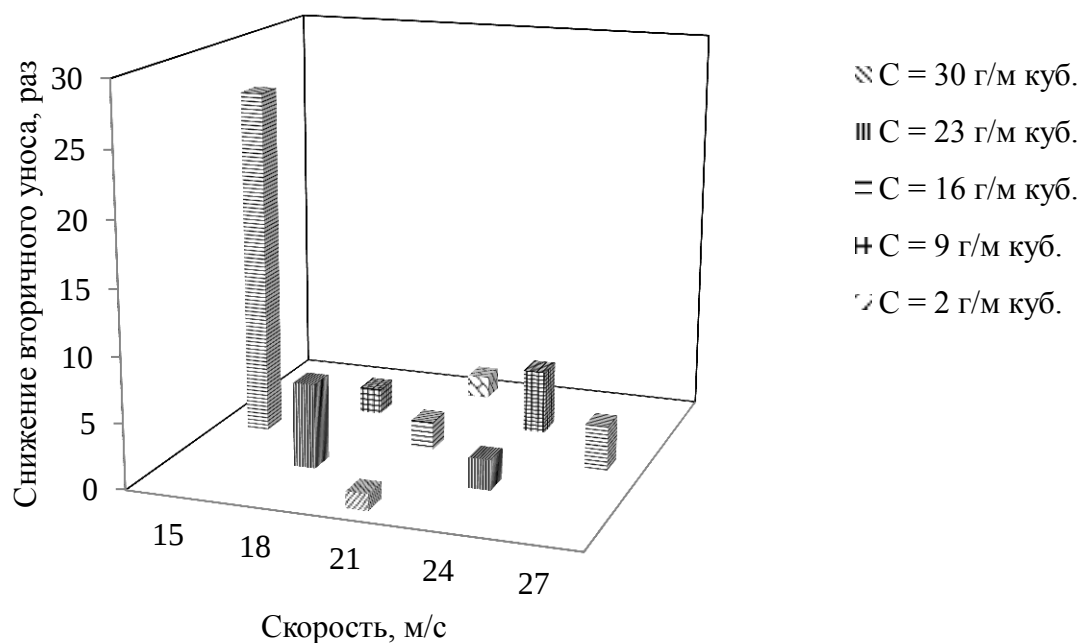


Рисунок 11. Уменьшение вторичного уноса в электроциклоне с установленными профилированными элементами по сравнению с вариантом без элементов

Таблица 2. Коэффициенты гидравлического сопротивления

№	Вариант аппарата	Коэффициент гидравлического сопротивления ξ
1	Аппарат без профилированными элементов, без орошения	4,16
2	Аппарат с профилированными элементами	4,43
3	Аппарат с орошением	4,31

На рисунке 12 приведены данные по гидравлическому сопротивлению электроциклона в рабочем режиме. В таблице 2 приведены значения коэффициентов гидравлического сопротивления ξ для различных вариантов электроциклона. Наименьшим сопротивлением обладает аппарат без профилированных элементов и без орошения, немного большим вариант с орошением, наибольшим вариант с профилированными элементами. Гидравлическое сопротивление аппарата при установке профилированных элементов различного размера практически не изменялось (± 10 Па).

Из рисунка 12 видно, что наименьшее гидравлическое сопротивление имеет аппарат без профилированных элементов и без орошения ($\Delta p = 1870$ Па при $W_{\text{ВХ}} = 27,4$ м/с), аппарат с орошением имеет большее гидравлическое сопротивление вследствие наличия движущейся плёнки воды на внешнем осадительном электроде ($\Delta p = 1940$ Па при $W_{\text{ВХ}} = 27,4$ м/с), аппарат с установленными профилированными элементами имеет наибольшее гидравлическое сопротивление ($\Delta p = 1990$ Па при $W_{\text{ВХ}} = 27,4$ м/с). Во всех трёх случаях гидравлическое сопротивление отличается незначительно (не более 120 Па).

Целью определения электрических характеристик электроциклона было определить наличие обратной короны в системе электродов, определить потребляемую блоком питания мощность при рабочих условиях для оценки затрат на газоочистку.

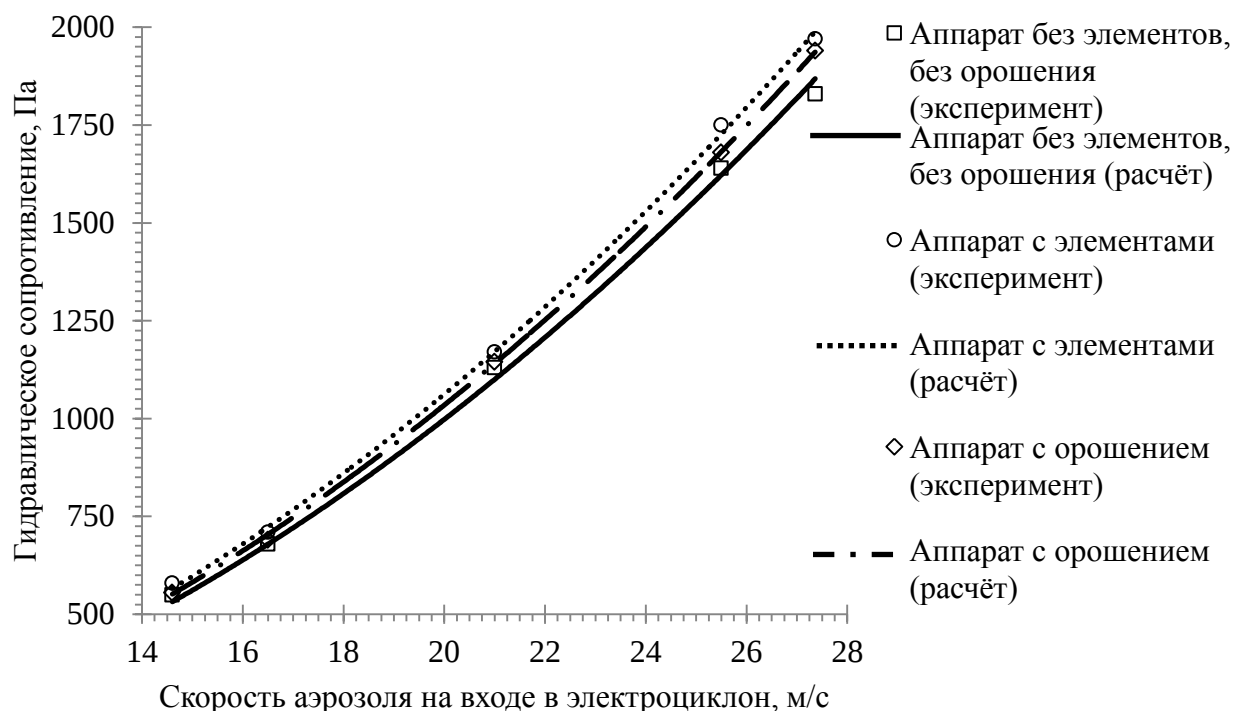


Рис. 12. Зависимость гидравлического сопротивления лабораторного аппарата от входной скорости аэрозоля

Энергопотребление электроциклона, параметры питающего агрегата, вольт-амперная характеристика (ВАХ) – являются важными исходными данными при проектировании, так как от них зависит эффективность зарядки частиц в активной зоне, а в конечном счёте – эффективность электроциклона.

На рисунке 13 приведена ВАХ электроциклона с нагрузкой по воздуху и с подачей золы (рабочий режим). Гистерезис не наблюдается, поэтому обратная корона отсутствует. Потребляемая при 17 кВ мощность составляет 6,5 Вт.

При скорости 18 м/с расход газа через электроциклон составляет 0,07 м³/с. При потребляемой мощности (на создание коронного разряда) 6,5 Вт удельное энергопотребление составит 92,9 Дж/м³ или 0,026 кВт·ч/1000 м³ очищаемого газа. Этот показатель не превышает типичного значения энергопотребления промышленного электрофилтра, равного 0,1 кВт·ч/1000 м³ очищаемого газа.

В четвёртой главе «Модель вторичного уноса частиц в электроциклоне» даётся математическое описание и результаты компьютерного моделирования вторичного уноса. Расчётные результаты сравниваются с опытными. Проводится верификация модели.

Движения частицы рассчитанные траектории частиц $d = 1$ мкм (а – без профилированных элементов $U = 0$ в кольцевом канале электроциклона смоделировано с использованием метода конечных элементов (программное обеспечение Comsol Multiphysics). На рисунке 13 показаны кВ, б - без профилированных элементов $U = 0$ кВ, в – с профилированными элементами $U = 17$ кВ).



Рисунок 13. ВАХ электроциклона в рабочем режиме

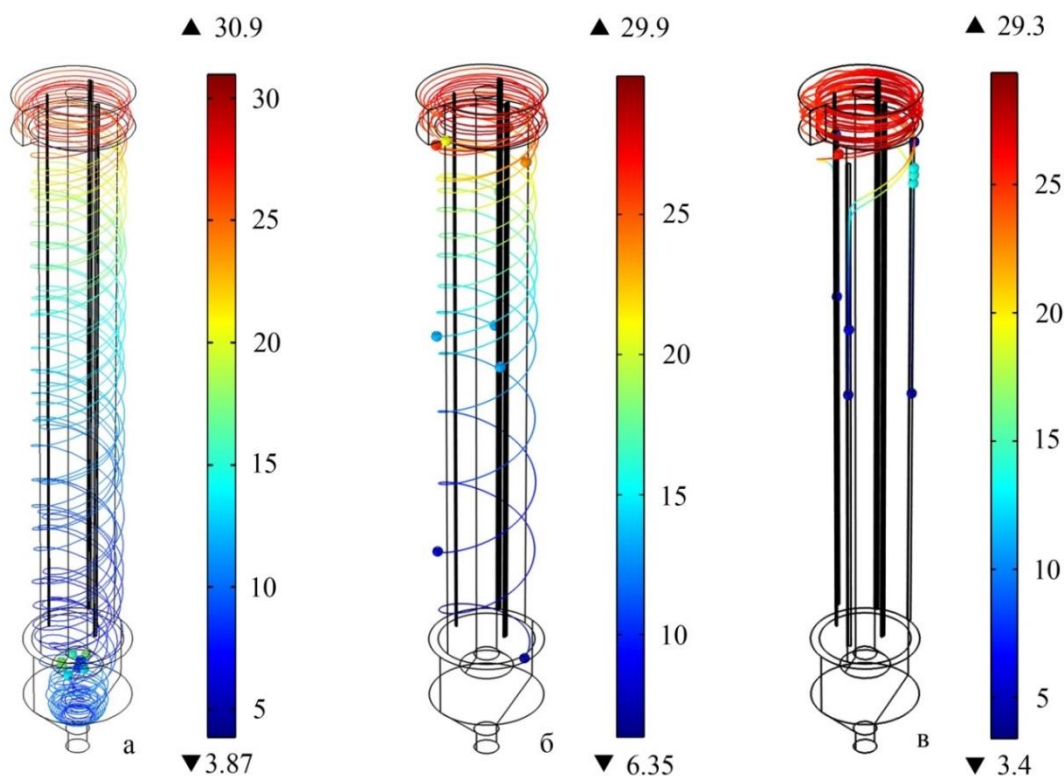


Рисунок 14. Рассчитанные траектории частиц при $W_{BX} = 25$ м/с

Частицы диаметром 10 мкм в отсутствии электрического поля (рисунок 14а) проходят активную зону электроциклона, не осаждаюсь, и достигают выхлопной трубы. Траектории спиральные, в бункере частицы движутся по кольцевым траекториям. В присутствии электрического поля (рисунок 14б) коронного разряда 5 частиц из 10 осели в верхней части активной зоны, ещё 3 осели в средней части, остальные частицы осели в нижней части. Выхлопной трубы не достигла ни одна из

частиц. Геометрия траекторий аналогична описанному выше случаю. В электроциклоне с установленными профилированными элементами (рисунок 14в) траектории частиц имеют несколько другую геометрию: угол закручивания меньше, 6 из 10 частиц оседают на верхних участках элементов, оставшиеся 4 движутся в каналах, образованных элементами, и оседают на их внутренней поверхности, пройдя от трети до половины длины активной зоны.

Сравнение опытных и расчётных значений характеризуется коэффициентом корреляции $R = 0,96$, модель адекватна экспериментальным данным.

В выводах сформулированы основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Вторичный унос снижает эффективность электроциклона на 6,0–32,7 % в диапазоне скоростей аэрозоля на входе в аппарат $W_{ВХ} = 14,6–24,7$ м/с и концентраций пыли на входе в аппарат $C_{ВХ} = 2,4–30,6$ г/м³. Отрицательное влияние вторичного уноса в электроциклоне проявляется наиболее сильно при $W_{ВХ}$ свыше 14–16 м/с. Так при $W_{ВХ} = 16,5$ м/с и $C_{ВХ} = 6,5$ г/м³ вторичный унос составляет 6,7 %, а при $W_{ВХ} = 25,5$ м/с при той же концентрации уже 32,2 %.
2. На величину вторичного уноса наибольшее влияние оказывает скорость аэрозоля на входе в аппарат. В меньшей мере влияют концентрация аэрозоля, рабочее напряжение на коронирующих электродах, орошение осадительного электрода.
3. Применение орошения осадительных электродов водой позволяет полностью устранить вторичный унос, а унос улавливаемого материала снижается с 2,1 % до 0,1 % (при $W_{ВХ} = 16,5$ м/с), с 11,3 % до 0,2 % (при $W_{ВХ} = 21,0$ м/с), с 24,1 % до 0,3 % (при $W_{ВХ} = 27,4$ м/с) при $C_{ВХ} = 16,5$ г/м³. В мокром режиме отпадает необходимость в регенерации электродов путём их встряхивания.
4. Вторичный унос снижается в 1,3–26,7 раз в диапазоне $W_{ВХ} = 15,0–27,0$ м/с и $C_{ВХ} = 2,0–30$ г/м³ путём применения в системах осадительных электродов профилированных элементов с глубиной от 3,0 до 7,0 мм и шириной от 30, до 7,0 мм. Так при $W_{ВХ} = 18,0$ м/с, $C_{ВХ} = 9,0$ г/м³ вторичный унос снижается в 2,0 раза (с 6,6 % до 3,3 %), а при $W_{ВХ} = 24,0$ м/с, $C_{ВХ} = 9,0$ г/м³ вторичный унос снижается в 4,9 раз (с 32,7 % до 6,6 %). Целесообразно выполнять С-образные элементы.
5. Разработана математическая (компьютерная) модель процесса пылегазоочистки в электроциклоне. Модель позволяет рассчитать траектории движения частиц, значения их мгновенных скоростей, распределение скоростей газа и электрическое поле, а также оптимальные технологические характеристики аппарата (диаметр, длину активной зоны, скорость аэрозоля и т.д.) и его оптимальные электрические характеристики (межэлектродное расстояние, напряжение питания, конфигурация коронирующих электродов и т.д.).
6. Предложенная методика расчёта электроциклона позволяет рассчитать конструктивные характеристики промышленного аппарата (диаметр, длину активной зоны, число ходов, межэлектродное расстояние), а также потребляемую электроагрегатами питания мощность.
7. Разработанный опытно-промышленный электроциклон показал наибольшую эффективность при пылеулавливании в процессе сушки алюмосиликатных микросфер и принят к внедрению ЗАО УралНИПИнефть (г. Екатеринбург).

8. Математическая модель и методика расчёта использованы для технологического расчёта промышленного электроциклона, рекомендованного для замены электрофильтров типа ЭГА на Рефтинской ГРЭС (пос. Рефтинский, Свердловская область), в рамках проекта модернизации газоочистного оборудования. Составлено и выдано техническое задание на разработку рабочего проекта промышленного аппарата производительностью 100 000 м³/ч ООО «Химтехнология» (г. Екатеринбург).

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах, определенных

ВАК:

1. Титов, А. Г. Исследование процесса улавливания летучей золы в экспериментальной модели электроциклона [Электронный ресурс]. / Н. В. Инюшкин, С. А. Ермаков, А. Г. Титов, З. Р. Гильванова, К. Л. Новиков, Д. А. Парамонов // Инженерный вестник Дона. – 2011. – № 4. – URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4y2011/524.html>.

2. Титов, А. Г. Исследование осаждения кристаллов перкарбоната натрия в электроциклоне / Н. В. Инюшкин, Ф. С. Югай, З. Р. Гильванова, А. Г. Титов, С. А. Ермаков // Известия ВУЗов. Серия «Химия и химическая технология». – 2012. – т. 55 вып. 10. – С. 104–107.

3. Титов, А. Г. Снижение вторичного уноса в электроциклоне. / Н. В. Инюшкин, И. В. Коробкова, Д. А. Парамонов, А. Г. Титов, З. Р. Гильванова, С. А. Ермаков, К. В. Седунов, И. П. Щелчков // Инженерный вестник Дона. – 2012. – № 4. – URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1271.html>.

4. Титов, А. Г. Оценка эффективности работы электроциклона / А. Г. Титов, З. Р. Гильванова, Н. В. Инюшкин, С. А. Ермаков, И. П. Щелчков, А. И. Аитова, М. Г. Маньков, Н. А. Токарева, С. А. Перфилов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2013. – № 10. – С. 11–14.

Titov, A. G. Efficiency of Electrostatic Cyclone Operation / A. G. Titov, Z. R. Gil'vanova, N. V. Inyushkin, S. A. Ermakov, I. P. Shchelchikov, A. I. Aitova, M. G. Man'kov, N. A. Tokareva, S. A. Perfilov // Chemical and Petroleum Engineering. – Vol. 49. – Nos. 9-10. – January, 2014. – P. 655–659.

Патенты на полезные модели:

5. Патент №136365 РФ, МПК В 03 С 3/15. Электроциклон / А. Г. Титов, З. Р. Гильванова, Н. В. Инюшкин, С. А. Ермаков, И. П. Щелчков, А. И. Аитова, Д. Г. Лукьянова, Н. А. Токарева, С. А. Перфилов. Заявитель и патентообладатель А. Г. Титов. – 2013141695/03, заявл. 10.09.2013; опубл. 10.01.2014, Бюл. № 1. 10.01.2014 г. – 2 с.

Программы для ЭВМ:

6. Программа для расчёта электроциклона / А. Г. Титов, С. А. Ермаков, М. А. Майков, Е. В. Осинников, А. А. Бир, М. К. Масनावиев, З. Р. Гильванова, Н. В. Инюшкин, А. А. Ермаков, И. С. Мельник; Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014615834 от 04.06.2014. – 1 с.

Другие публикации:

7. Титов, А. Г. Экспериментальное исследование степени улавливания перкарбоната натрия в электроциклоне / Н. В. Инюшкин, Ф. С. Югай, З. Р. Гильванова, А. Г. Титов, С. А. Ермаков // Актуальные проблемы техники и технологии: Сборник докладов

- дов V-й Международной научной конференции (Липецк, 29 октября 2011 г.). / Отв. ред. А.В. Горбенко. - Липецк: Издательский центр «Гравис», 2011. – С. 151–153.
8. Титов, А. Г. Влияние конструктивных характеристик коронирующего электрода на эффективность улавливания летучей золы в экспериментальной модели электроциклона // А. Г. Титов, З. Р. Гильванова, Н. В. Инюшкин, С. А. Ермаков // Техника и технология: новые перспективы развития: Материалы IV Международной научно-практической конференции (09 декабря 2011). – М.: Издательство «Спутник+», 2011. – С. 42–47.
9. Титов, А. Г. Исследование процесса улавливания алюмосиликатных полых микросфер в лабораторной модели горизонтального электроциклона / А. Г. Титов, З. Р. Гильванова, Н. В. Инюшкин, С. А. Ермаков // Актуальные вопросы современной науки: Материалы XIV Международной научно-практической конференции (31 января 2012 г.): Сборник научных трудов / Под ред. д.п.н., проф. С.П. Акутиной. – М.: Издательство «Перо», 2012. – 429 с.
10. Титов, А. Г. Новая конструкция осадительных электродов электроциклона для снижения вторичного уноса / А. Г. Титов, Н. В. Инюшкин, С. А. Ермаков, З. Р. Гильванова, И. В. Коробкова, Д. А. Парамонов, К. В. Седунов // Актуальные вопросы современной техники и технологии: Сборник докладов VIII-й Международной научной конференции (Липецк, 23 июля 2012 г.). / Отв. Ред. А.В. Горбенко. – Липецк: Издательский центр «Гравис», 2012. – С. 44–46.
11. Титов, А. Г. Планирование эксперимента по улавливанию дисперсных частиц в электроциклоне // А. Г. Титов, Н. В. Инюшкин, С. А. Ермаков, З. Р. Гильванова, И. В. Коробкова, А. И. Аитова // Технические науки – от теории к практике: Материалы XVII международной практической конференции (Новосибирск, 23 января 2013 г.). / Новосибирск: НП «СибАК», 2013. – С. 33–36.
12. Титов, А. Г. Расчёт гидродинамики потока в электроциклоне // А. Г. Титов, З. Р. Гильванова, Н. В. Инюшкин, А. И. Аитова, И. П. Щелчков, Н. А. Токарева, М. Г. Маньков, С. А. Перфилов // «Химия в федеральных университетах». Сборник статей Всероссийской конференции / Екатеринбург: УрФУ, 2013. – С. 158–161.
13. Титов, А. Г. Влияние параметров очищаемого аэрозоля на эффективность электроциклона / А. Г. Титов // Пылегазоочистка-2013: Сборник докладов VI-й Международной конференции (Москва, 24–25 сентября 2013 г.). / ООО «ИНТЕХЭКО», 2013. – С. 66–70.
14. Titov, A. G. The Investigation of Re-Entrainment Influence on the Electrocyclone Effectiveness / A. G. Titov, Z. R. Gil'vanova, N. V. Inyushkin, A. A. Bir, M. K. Masnaviev, E. V. Osinnikov // Topical Questions of Modern Technics and Technology: collection of papers of XIV-th International Scientific Conference (Russia, Lipetsk, January 24, 2014). / Managing editor : Anton V. Gorbenko. Lipetsk: Publishing Center "Gravis", 2014. P. 60–65.